

## 論 文

1980年代の航空機観測を用いた北西太平洋の台風の中心気圧と  
ドボラック法 CI 数の関係に関する再調査

北島尚子\*, 加藤浩司\*\*, 徳野正己\*\*\*

Reexamination of the Relationship between Central Pressure of Tropical Cyclones  
in the Western North Pacific and CI Numbers of the Dvorak's Technique  
Using Aircraft Reconnaissance in the 1980s

Naoko KITABATAKE, Koji KATO and Masami TOKUNO

## 要 旨

台風の強度解析に用いられるドボラック法では、静止衛星赤外画像の雲パターンから決定した CI 数から台風の中心気圧に換算する表を使用する。この表は 30 年近く前に作成され現在も使用されているが、現代から見ると、衛星解析ツールの機能が十分でなかったなどの問題が指摘される。本研究では 1981～1985 年の米軍による航空機観測データと、再解析による CI 数とを比較して、現在使用されている換算表は妥当であるが、短時間の変動は把握できないことを指摘した。また近年のデータを用いた解析も行い、近年の台風中心気圧解析値は平均値としては妥当であることも示した。

## 1. はじめに

台風の強度（中心付近の最大風速及び中心気圧）の解析は、台風災害の軽減のために重要である。しかし現業航空機観測の行われていない北西太平洋の台風に関しては、各国等の現業センターの解析値が異なることがある。この解析においては、静止衛星画像を用いたドボラック法（Dvorak, 1984 : 以後 D84 とする）の解析が有力な参考資料となるが、

衛星解析による CI 数を台風強度に変換する際の換算のしかたが異なることが、台風強度解析値に差異が生じる一因となることがある。

ドボラック法における CI 数から台風強度への換算表について、これまでに提案され使用されているものを第 1 表に示す。近年は米軍合同台風警報センター（Joint Typhoon Warning Center : 以後 JTWC とする）や多くの国の現業センターが D84 に掲載

\* 気象大学校, \*\* 気象庁予報部, \*\*\* 気象研究所 (2013 年 3 月退職)

(2017 年 8 月 9 日受領, 2018 年 1 月 30 日受理)

第1表 先行研究によるドボラック法の CI 数と最大風速及び中心気圧との関係

D73, D75, D84, K90 は本文参照. 単位は, 最大風速はノット, 中心気圧は hPa. D75 の中心気圧のみ, CI 数の代わりに T 数と対応させている.

CI	Dvorak による 最大風 速 (D73, D75, D84)	Dvorak による中心気圧					K90 による北西太 平洋の値	
		大西洋		北西太平洋			最大風 速	中心気 圧
		D73	D75, 及 び D84	D73	D75	D84		
1.0	25	-	-	-	-	-	22	1005
1.5	25	1010	-	1004	-	-	29	1002
2.0	30	1007	1009	1001	1003	1000	36	998
2.5	35	1003	1005	997	999	997	43	993
3.0	45	998	1000	992	994	991	50	987
3.5	55	993	994	987	988	984	57	981
4.0	65	988	987	982	981	976	64	973
4.5	77	979	979	973	973	966	71	965
5.0	90	970	970	964	964	954	78	956
5.5	102	960	960	954	954	941	85	947
6.0	115	948	948	942	942	927	93	937
6.5	127	934	935	928	929	914	100	926
7.0	140	920	921	914	915	898	107	914
7.5	155	906	906	900	900	879	115	901
8.0	170	891	890	885	884	858	122	888

されている表を用いている (World Meteorological Organization, 2012, p.2). Dvorak は 1973 年と 1975 年に先行する報告を公表している (Dvorak, 1973 ; 1975 : 以後それぞれ D73 と D75). それらにおいては, CI 数に対する最大風速の値には D73 から D84 まで変更がない. 中心気圧に関しては, D73 は CI 数と関連付けているが D75 では T 数と関連付け, D84 で再び CI 数と関連付けている (以後, 簡単のために D75 に関して CI 数と対応させたものとして記述する). 北西太平洋の台風の中心気圧に関しては, D75 から D84 で大幅に変更しており, CI 数が大きいほど中心気圧が低い値になるように

している. 例えば CI=8.0 の場合は D73 で 885hPa, D75 で 884hPa であるのに対して D84 では 858hPa と, 当初より 30hPa 近く低い値とされている. これらの換算表の根拠としては, D73 と D75 では「主に北西太平洋海域で取得されたデータに基づき経験的に決定した」としている. D84 では, Shewchuk and Weir (1980) を中心気圧の大幅な変更の根拠としているが, そこでは Atkinson and Holliday (1977) の最大風速と中心気圧の関係式に基づくとしている. しかし, D84 の大幅な変更の根拠として CI 数と中心気圧を直接関連付けた調査は示されていない. なお, ドロップゾンデ観測による台風中心

気圧の最低値の記録は1979年のT7920 (Tip) の870hPaで、D84にある858hPa程度の中心気圧がドロップゾンデで観測された台風はない。

気象庁ではCI数から台風強度への変換には木場ほか(1990:以後K90)の換算表(第1表)を用いている。これはDvorakの一連の表とは中心気圧・最大風速共に異なった値となっている。この差異が、台風強度の発表する値がセンターによって異なる要素のひとつであると指摘されることがある(例えばChoy *et al.*, 2015)。K90は1980年代に北西太平洋で米軍により現業航空機観測が行われていた期間の気象庁ベストトラックデータとCI数の比較により作成したものである。現代的な視点からこの表の作成過程を見直すと、次のような点が課題として考えられる。①CI数の決定には現行のような正方形図法に変換したのではない画像を用いており海域によっては歪みが大きく、また動画が使えなかった。また解析者の習熟度もまちまちであった可能性がある。②航空機観測のなかった時間帯のベストトラックデータも使われており、台風の中心気圧の値の精度が良くなかった解析も含まれていた可能性がある。

このうち①の問題に関して、徳野ほか(2009)は、2008年当時に現業作業に使用されていた衛星解析ツールを利用して1980年代の台風の再解析を行った。K90が当時の解析で使用したCI数は記録が残っていないが、徳野ほか(2009)は、K90が解析に使用した台風事例のベストトラックデータが当時のCI数とK90の換算表に対応していると仮定して、ベストトラックデータからCI数を推定。そしてそれを再解析のCI数と比較して、最大でCI数に0.5程度の差がある可能性があるとしている。

今回は、徳野ほか(2009)の再解析CI数と、検証値とする中心気圧の値としてはベストトラック解析の代わりに航空機観測の観測値を用いて、調査を行う。

さらに、近年の北西太平洋では、2008年にはTHORPEX Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC)、2010年にはImpact of Typhoons on the Ocean in the Pacific (ITOP)と、特別観測プロジェ

クトで航空機による貫通飛行とドロップゾンデ観測が行われた(Nakazawa *et al.*, 2010; D'Asaro *et al.*, 2014)。観測事例数は少ないが、それについて気象庁のドボラック解析値と比較を行う。

本稿では、使用したデータや調査方法を第2章で示したうえで、第3章で上記の1980年代と近年の航空機観測とCI数の比較調査を行う。1980年代CI数としては徳野ほか(2009)の再解析値を用いる。そこで比較されるCI数と航空機観測値の間には、事例によっては小さくない誤差が生じるので、第4章では、いくつかの事例について時系列で航空機観測とCI数を比較し、発達・衰弱や最発達期における特徴を示す。それをふまえて第5章では、各台風のライフサイクルにおける最発達期の航空機観測とCI数の変化の特徴を統計的に示す。さらに第6章では、特に強い台風として、CI数6.0以上の事例について、航空機観測のある1980年代と航空機観測のない2011～2014年について、比較を行い、近年の気象庁の解析で系統的な差異が生じているのかどうかを検討する。第7章でまとめと残された課題について述べる。

なお、今回は台風強度としては中心気圧のみを対象とし、最大風速については議論しない。時刻は協定世界時(UTC)である。

## 2. データと方法

### 2.1 解析対象の台風と米軍航空機観測データ

#### 2.1.1 1981～1985年の台風

今回の調査対象とした1980年代の台風は、1981～1985年の41個(第2表)である。選択の基準はK90と同じく気象庁ベストトラックで950hPa以下まで発達した台風だが、K90で扱った48個の台風のうち1986年のものを除いた39個に加え、K90では使用されていなかったT8118 (Agnes, 最低気圧950hPa)とT8427 (Doyle, 最低気圧940hPa)の2個を加えた。この2個がK90に採用されなかった理由は不明だが、特殊な構造を持っているなどの除外するべき理由が見当たらないので、本研究では事例数を増やすために解析に含めている。なお、K90で調査対象に含めていたT8218 (Judy)は現在

第2表 調査対象とした1981～1985年の台風リスト

同じ気圧やCI数が複数回記録された場合は、最初に記録された時刻（UTC）を示す。気圧の単位はhPa。

台風番号	英名	ベストトラック最低気圧		航空機観測最低気圧		最大CI数	
		年/月/日/時	最低気圧	年/月/日/時:分	最低気圧	年/月/日/時	最大CI数
8101	Freda	1981/3/15/06	945	1981/3/15/16:07	944	1981/3/15/06	6.5
8118	Agnes	1981/8/30/18	950	1981/8/31/02:05	949	1981/8/29/06	5
8120	Clara	1981/9/19/12	925	1981/9/19/09:44	924	1981/9/19/06	7
8122	Elsie	1981/9/27/18	895	1981/9/27/21:20	893	1981/9/27/12	7.5
8124	Gay	1981/10/18/06	950	1981/10/18/08:11	947	1981/10/19/18	5.5
8126	Irma	1981/11/22/12	905	1981/11/22/08:42	905	1981/11/22/06	7.5
8128	Kit	1981/12/17/12	925	1981/12/17/08:30	924	1981/12/17/12	7
8129	Lee	1981/12/25/06	950	1981/12/25/09:05	948	1981/12/25/06	5.5
8202	Nelson	1982/3/25/06	935	1982/3/25/07:42	934	1982/3/24/12	7
8204	Pat	1982/5/20/00	945	1982/5/20/10:03	943	1982/5/21/00	6.5
8209	Andy	1982/7/28/12	930	1982/7/27/09:21	915	1982/7/26/18	5.5
8210	Bess	1982/7/29/00	900	1982/7/28/22:02	901	1982/7/28/12	7
8211	Cecil	1982/8/08/12	920	1982/8/08/09:21	920	1982/8/07/12	6
8213	Ellis	1982/8/22/18	915	1982/8/23/06:12	920	1982/8/22/12	7
8215	Gordon	1982/8/29/06	945	1982/8/30/08:32	945	1982/8/28/18	5
8217	Irving	1982/9/12/06	950	1982/9/12/06:23	947	1982/9/12/06	6
8218	Judy	1982/9/09/00	955	1982/9/09/08:48	959	1982/9/08/18	5
8219	Ken	1982/9/18/06	940	1982/9/20/06:23	936	1982/9/20/00	6
8221	Mac	1982/10/05/00	895	1982/10/04/21:07	895	1982/10/04/12	7.5
8222	Nancy	1982/10/14/06	935	1982/10/14/09:41	933	1982/10/14/12	7
8223	Owen	1982/10/20/18	940	1982/10/20/20:40	939	1982/10/20/12	6
8224	Pamela	1982/11/28/06	950	1982/11/28/08:27	947	1982/11/27/06	6.5

確認できる気象庁ベストトラックデータでは最低気圧が955hPaだが、今回の調査に含めた。

米軍航空機観測データ（付録A参照）は観測直後にGTS回線でも共有され、当時の気象庁の現業解析やベストトラック解析にも使われた。今回の調査では1981～1985年のJTWC年報に掲載されているデータを用いた。ただし、明らかに誤植とみなされるデータは除外した。これにより使用した中心気圧観測値は513個である。1986年の台風について

は航空機観測データがJTWC年報に掲載されていないため、今回の調査には含めていない。

### 2.1.2 2000年代に航空機観測が行われた台風

北西太平洋海域では、2008年にT-PARC、2010年にITOPと、2回の特別観測プロジェクトが行われ、航空機観測が行われた（Nakazawa *et al.*, 2010；D'Asaro *et al.*, 2014）。T-PARCは台風とそれに関連する現象の予測可能性に関する研究プロジ

第2表 (続き)

台風番号	英名	ベストトラック最低気圧		航空機観測最低気圧		最大 CI 数	
		年/月/日/時	最低気圧	年/月/日/時:分	最低気圧	年/月/日/時	最大 CI 数
8304	Wayne	1983/7/24/00	920	1983/7/23/23:25	921	1983/7/24/00	6.5
8305	Abby	1983/8/08/18	895	1983/8/08/20:49	888	1983/8/08/18	7.5
8309	Ellen	1983/9/06/06	925	1983/9/05/23:43	928	1983/9/06/06	7
8310	Forrest	1983/9/23/00	885	1983/9/22/23:07	883	1983/9/22/18	7
8317	Marge	1983/11/04/00	895	1983/11/04/09:19	896	1983/11/03/18	7.5
8319	Orchid	1983/11/23/12	930	1983/11/23/22:56	931	1983/11/23/18	7
8406	Dinah	1984/7/29/00	915	1984/7/28/23:28	916	1984/7/26/12	6.5
8407	Ed	1984/7/29/12	950	1984/7/29/08:35	945	1984/7/29/12	5.5
8411	Ike	1984/9/01/06	950	1984/9/01/08:45	947	1984/9/04/12	6.5
8421	Thad	1984/10/21/12	935	1984/10/22/05:36	925	1984/10/22/00	7
8422	Vanessa	1984/10/26/16	880	1984/10/26/11:14	879	1984/10/26/12	7.5
8424	Agnes	1984/11/04/06	925	1984/11/04/11:27	925	1984/11/04/12	6.5
8425	Bill	1984/11/14/12	910	1984/11/14/22:34	909	1984/11/14/12	7
8426	Clara	1984/11/20/00	940	1984/11/19/20:21	942	1984/11/19/12	6
8427	Doyle	1984/12/07/18	940	1984/12/07/20:47	935	1984/12/07/18	6
8503	Gay	1985/5/24/06	950	1985/5/24/08:18	952	1985/5/24/06	5.5
8511	Nelson	1985/8/23/00	950	1985/8/21/20:38	963	1985/8/22/00	5.5
8522	Dot	1985/10/16/12	895	1985/10/16/12:14	897	1985/10/15/12	7.5
8526	Hope	1985/12/20/06	950	1985/12/20/06:02	948	1985/12/19/18	5.5

エクトだが、同時期に米軍による航空機観測が米国のプロジェクト Tropical Cyclone Structure-2008 (TCS-08) の枠組みで行われたものである。この TCS-08 は台風の発生・発達・構造変化の解明を目的としていた。また ITOP は台風に伴う大気海洋相互作用の解明を目的としていた。このような目的であったため、航空機観測が行われたのは台風の発達期～最盛期に限定される。実際に貫通飛行やドロップゾンデ観測が行われたのは、2008 年には T0813 (Sinlaku) と T0815 (Jangmi)、2010 年には T1011 (Fanapi)、T1012 (Malakas)、T1013 (Megi) の計 5 個であった。これらのデータも従来同様に観測直後に GTS 回線でも共有された。観測された台風 5 個

に対する観測飛行の回数は計 18 回、ドロップゾンデ観測の回数は計 43 回である。

## 2.2 衛星解析による CI 数

### 2.2.1 1980 年代の台風の CI 数の再解析

1980 年代の台風の CI 数は、徳野ほか (2009) が行った再解析の結果 (付録 B 参照) を用いた。K90 では 12 時間ごとの CI 数を使用していたのに対して今回は 3 時間ごとの画像を用いた 6 時間ごとの解析値を用いており、また 1980 年代には使用できなかった動画機能や解析に適した画像表示機能を用いているので、今回のほうが解析精度は高く均質であると考えられる。2000 年以降の台風の CI 数

は、ベストトラックデータ作成のために当時の手法で解析されたものを用いる。ただし、両者の解析は以下のように拘束条件の点で異なっている。

ドボラック解析では急激な発達・衰弱の場合に T 数の変化に制限（拘束条件）をかけており（D73, D75, D84）、急発達・急衰弱が十分に表現されない可能性があることが指摘されている（例えば Velden *et al.*, 2006）。気象庁の解析では具体的には 6 時間では  $\pm 1.0$ , 12 時間で  $\pm 1.5$ , 18 時間で  $\pm 2.0$ , 24 時間で  $\pm 2.5$  を変化の上限としていて（菊池, 2004）、それに伴い CI 数の変化も抑制されるので、例えば 12 時間の発達・衰弱は 30hPa 以内程度、24 時間の発達・衰弱は 50hPa 以内程度に制限されることになる。

本研究で対象とした 1981～85 年の台風 41 個（第 2 表）のうち、ベストトラックにおいて 24 時間で 50hPa を超える発達が記録されているのは 9 個（今回調査した台風の 22%）あった。しかしそれのうち、徳野ほか（2009）による再解析において一時的に拘束条件を超える CI 数の増大があったのは 4 個のみで、残りの 5 個については CI 数の増大は拘束条件を超えることはなかった。つまり、調査対象の台風のうちの 10% のみはそのライフサイクルのごく一部の期間に拘束条件の有無による CI 数の差異が生じているもので、全体から見れば発達期の CI 数の変化に対する拘束条件の影響はごく小さいと言える。

一方、ベストトラックにおいて 24 時間で 50hPa を超える衰弱（上陸または温帯低気圧化に伴う）が記録されているのは 3 個（7%）にとどまるが、ライフサイクルの最終段階または陸地（主にフィリピン）通過時に一時的に拘束条件を超える CI 数の減少のあった台風は 24 個と 60% 近かった。ただし、台風が陸上を通過する際は航空機観測は行われないので、急衰弱時の拘束条件による過小な CI 数と航空機観測とが比較される頻度は小さい。

以上からは、拘束条件なしの CI 数の変化は、航空機観測と比較すると、発達期には過小、衰弱期には過大となる傾向があるように見える。しかし、今回の調査において航空機観測と比較する時刻に関し

ては、拘束条件を適用したとしても、なしの場合とで差が生じる頻度は全体と比較するとごく少なかったと考えられる。

なお、今回用いた 1980 年代の CI 数の再解析では拘束条件ありの場合の解析も行われたが、現業解析の拘束条件とは異なる方法であった（付録 B 参照）ので、今回は議論を簡単にするために 1980 年代の台風に関しては拘束条件なしの CI 数解析値のみを用いている。

### 2.2.2 2000 年代以降の台風の CI 数

2000 年代の台風については、CI 数は気象庁ベストトラックデータ作成のための事後解析のデータを用いた。これは基本的に菊池（2004）の方法に沿って行われたもので、発達・衰弱時の拘束条件が適用されている。

### 2.3 航空機観測と CI 数の比較

K90 では、米軍航空機観測も資料として用いて決定した気象庁ベストトラックデータのうち 00 時と 12 時の解析値と、同時刻の CI 数解析値（当時の解析値）により、回帰式を作成していた。これについては以下の 3 点が課題として考えられる。1) 気象庁ベストトラックデータの解析には CI 数も用いているので、ベストトラックデータと CI 数の比較は独立資料による調査ではなかった。2) 航空機観測データのない期間のデータも比較に使用しており、信頼できる現場観測データのない期間も比較に含まれていた。3) CI 数は 0.5 ごとに数値化されているが、これは便宜的な値であり、中心気圧値と回帰式（単回帰または重回帰）で関係づけられる保証はない。

今回は、6 時間ごとの CI 数解析値から、航空機観測の時刻に最も近い時刻のものと、航空機観測による中心気圧を直接比較した。このため、両者には最大で約 3 時間の時間差がある。この比較を、1980 年代の航空機観測と再解析 CI 数（拘束条件なし）、及び 2008・2010 年の航空機観測と現業事後解析 CI 数について行う。これらの結果は第 3 章～第 5 章で述べる。

### 3. 統計調査の結果

#### 3.1 1980年代の観測値の比較

K90の妥当性の再確認のため、まず1981～1985年の航空機観測による中心気圧と、その観測時刻に最も近い再解析CI数とK90を用いた中心気圧推定値を直接比較した。この期間の513個の航空機観測データの中には、該当する時刻の衛星画像がなくCI数が決定されなかった事例があり、結果として、ここで使用したデータは500個である。第3表にCI数ごと(CI数2.0以上)の中心気圧の平均値及び標準偏差を示す。CI=3.0以下と5.0を除き、各CIとも航空機観測の平均の検定がK90を用いた推定値との比較では有意水準95%で有意と言える。

ここで、CI数3.5以下ではD75・D84・K90を用いた推定値より航空機観測の方が中心気圧が低いことには、環境場の気圧の影響が大きいことも考えられる。台風の雲パターンが表していると考えられる渦の強度として重要なのは風速であり、それを考

えるには中心気圧そのものよりも環境場の平均気圧と中心気圧との差を考える必要がある。台風の中心気圧が比較的浅い場合は環境場の気圧の影響が大きくなる。一方、航空機観測は、台風が低緯度の海上にある発生期には比較的頻度が多いが、台風がやや高緯度側(そこでは低緯度よりも気温が低いために海面気圧が高めになる)に進み陸地に接近すると頻度が低下する(後出の第4章及び第3図を参照)。このため本研究で扱っているCI数の小さい比較的弱い台風事例は、低緯度で環境場の気圧が低い中で生じているために中心気圧も低めになっているものに偏りがある可能性がある。しかし、本研究で特に関心があるのは比較的強い強度まで発達した台風に関してであり、CI数4.0以上がおおむね64ノット以上のtyphoon強度に相当する(第1表参照)ので、CI数3.5以下の台風に関してはこれ以上議論しない。

同様に航空機観測データをD75及びD84を用いた推定値と比較すると、D75ではCI=6.0以下がす

第3表 1981～1985年の台風に関する、再解析CI数に対する航空機観測による台風中心気圧(hPa)の統計

D75, D84及びK90は先行研究によるもの(本文参照)で、斜字は航空機観測による平均値がそれと等しいとする仮説が有意水準95%で棄却される。

CI	N	平均 ( $\sigma$ )	D75	D84	K90
2.0	18	992 (9)	1003	1000	998
2.5	30	988 (11)	999	997	993
3.0	49	984 (10)	994	991	987
3.5	44	977 (13)	988	984	981
4.0	46	974 (13)	981	976	973
4.5	40	968 (13)	973	966	965
5.0	63	960 (11)	964	954	956
5.5	62	946 (12)	954	941	947
6.0	55	939 (18)	942	927	937
6.5	40	931 (16)	929	914	926
7.0	28	918 (17)	915	898	914
7.5	19	898 (9)	900	879	901
8.0	0	n/a	884	858	888

べて棄却, また D84 では CI=4.0 と 4.5 を除きすべて棄却される. すなわち, D84 は D75 から修正されたものであるがそれを用いた推定値と航空機観測による中心気圧とは合っているとはいえないと言わざるを得ない.

このように, 平均値の比較では D84 よりも K90の方が良さそうに見える. ただし, CI 数ごとに対応する中心気圧の航空機観測値は標準偏差が 10hPa 程度以上ある. 航空機で観測された中心気圧の頻度を第 1 図に示す. 航空機観測による中心気圧の平均値は, K90 を用いた推定値に近いと言っても, K90 を用いた推定による中心気圧との差が 20hPa 以上であった観測も少なからずあることに注意が必要である.

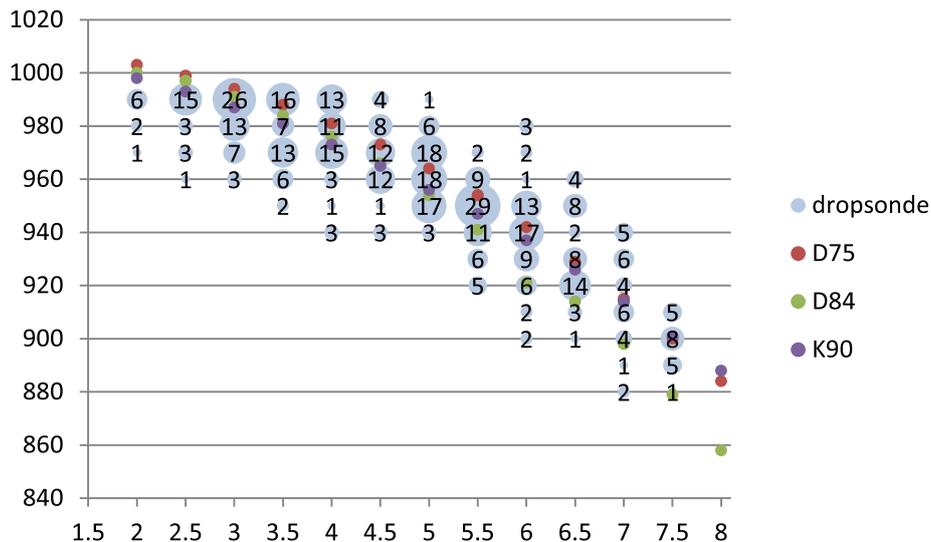
### 3.2 T-PARC2008 と ITOP2010

近年の特別観測プロジェクトで航空機観測が行われた台風についても, 前節と同様の比較を行った. 18 回の観測飛行で, 一連の観測のうち複数のドロップゾンデ観測の通報が行われた場合はその最後の観測のデータを採用した. これは観測が主に台風の発達期であり, 数時間の間でも最後の観測で気圧が

低い傾向があったからである. その結果を第 2 図に示す. データ数が 18 個と少ないので検定はできないが, ここでは D84 を用いた中心気圧推定値は低すぎ, D75 や K90 の中心気圧推定値が妥当であるように見える. これは第 3.1 節の 1980 年代の観測との比較と同じ傾向である.

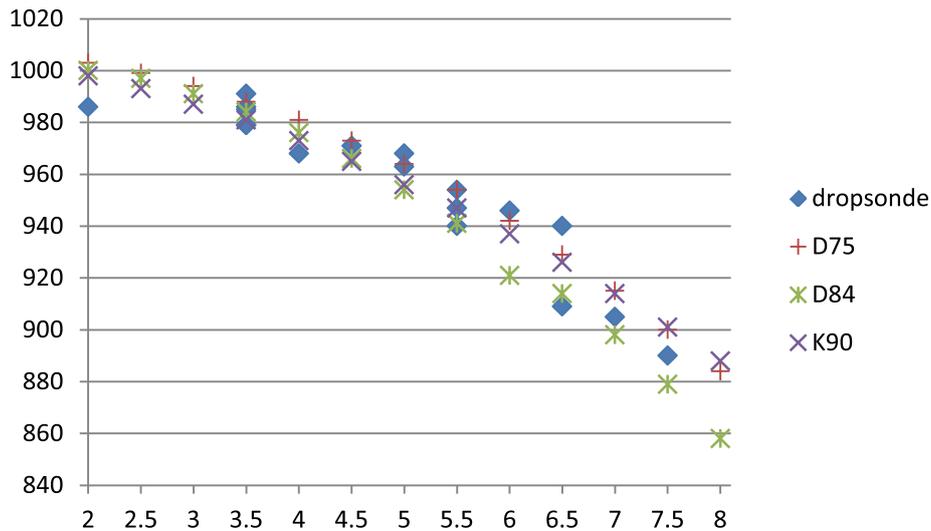
### 4. 事例解析

第 3 章の統計調査の結果から, K90 の気圧値は平均値としては妥当な値であると考えられる. ただし, 現実の台風は第 3 表に標準偏差 ( $\sigma$ ) で示したように, 同じ CI 数でも強度のばらつきは非常に大きい. 第 3 図にいくつかの台風の中心気圧について, 気象庁ベストトラックデータと, CI 数から K90 の表を用いて中心気圧を推定した値 (以下, ドボラック解析と称する), 及び航空機観測による中心気圧の変化を示す. 航空機観測による中心気圧としては, ドロップゾンデ観測による中心気圧として報告された値に加え, 報告された 700hPa 面の最低高度  $h$  から「渡辺和夫の実験式」(気象庁予報部, 1973, p.139)



第 1 図 1980 年代の台風に関する, CI 数 (横軸) に対するドロップゾンデ気圧観測値 (縦軸, hPa)

青の円の大きさと数値は観測頻度 (10hPa ごと) を表す. 赤・緑・紫の点は, それぞれ, 過去の文献における CI 数に対する中心気圧値を示す.



第2図 第1図と同様、ただし2008年と2010年の台風に関する航空機観測  
青のひし形はドロップゾンデによる中心気圧観測値を表す。

$$P_c = 634 + 0.0364h \quad (1)$$

(この式において  $h$  の単位はフィート) で換算した中心気圧  $P_c$  (hPa) も使用した (付録 C も参照)。

#### 4.1 T8221 (Mac)

この台風 (第3図 a) は、発達期に2回、拘束条件を超える CI 数の増大があった。1回目は10月2日00時の CI=2.0 から24時間後の CI=5.0 である。これに対して航空機観測とそれをを用いたベストトラックでは、2日12時から35hPa/24hrの発達としている。2日18時にはドボラック解析では CI=4.5 (965hPa)、ベストトラックでは985hPaと、20hPaの差が生じた。仮に現行の拘束条件 (菊池, 2004) ありのドボラック解析を行ったとすると、同じ時刻には CI=4.0 (973hPa) となり、差はやや小さくなる。しかし差の主な要因は発達のタイミングのずれであり、拘束条件による改善は限定的である。

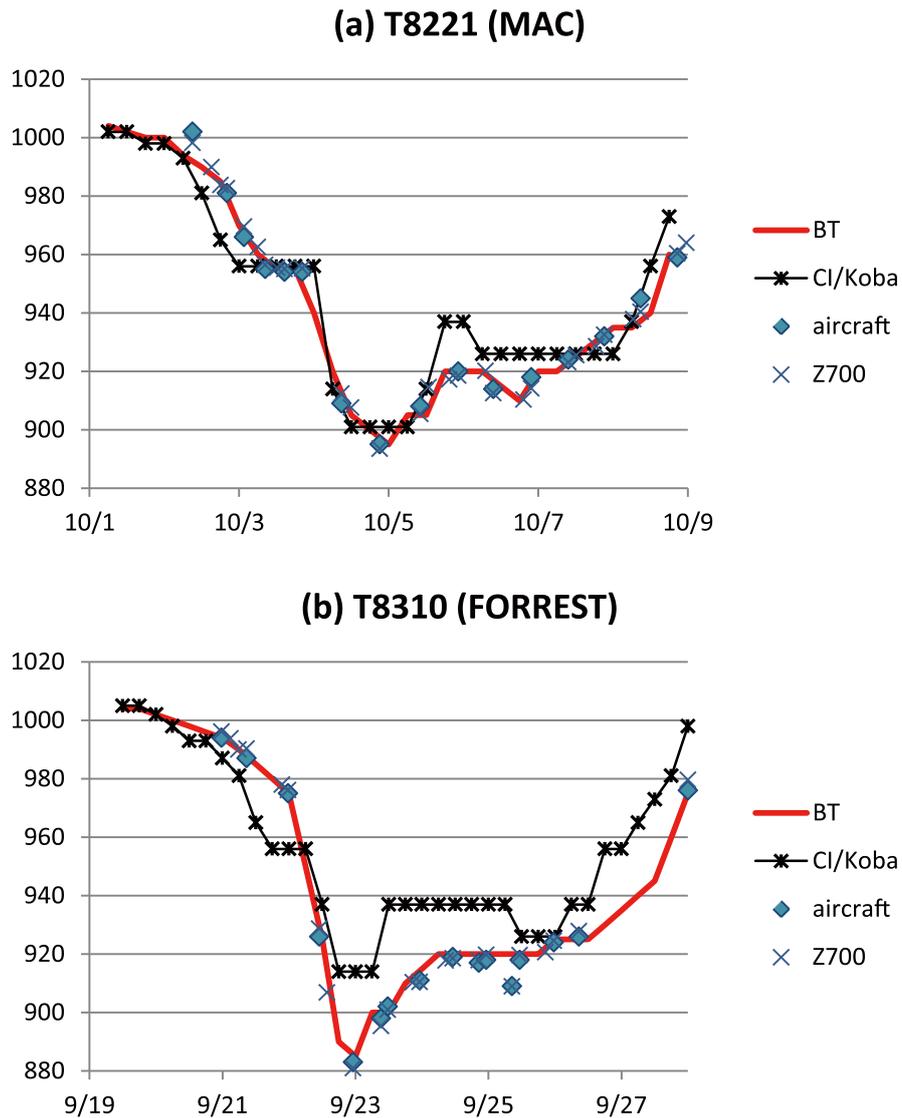
3日にはいったん発達を止めたあと、4日にはドボラック解析では00時の CI=5.0 (956hPa) から12時の CI=7.5 (901hPa) への変化があった。これが拘束条件を超える CI 数増大の2回目である。ベストトラックでは00時の940hPaから12時の

905hPaに発達しており、12時の中心気圧と CI 数との対応は悪くない。現行の拘束条件ありでドボラック解析を行うと4日12時は CI=7.0の914hPaとなり、かえって誤差が大きくなる。もっともこの場合、航空機観測も使用して解析されたベストトラックでのこの時期の急発達とは3日18時から50hPa/24hrの発達であり、ドボラック解析における急発達開始のタイミングが合っていないために急発達初期である4日00時の CI 数と気圧が上記のように合わないことが問題である。

最盛期である10月5日00時ごろはドボラック解析と航空機観測・ベストトラックは比較的良好に合っている。航空機観測ではこのころの眼は直径12海里 (nautical mile, 22km) の一重眼と記録されており、成熟期の台風の典型的な構造と考えられる。

6日には CI 数には1.5/12hrのやや大きな減少があったが、航空機観測ではそれほど大きな衰弱ではなく、結果的にドボラック解析とベストトラックで20hPa程度の差が生じている。

この台風の最終段階は、関東東方での温帯低気圧化に伴い、CI 数は2.0/12hrの拘束条件を超える減少だが、航空機観測では中心気圧増大はそれほど大きくなく、8日18時にはドボラック解析とベス



第3図 代表的な台風の中心気圧解析値及び観測値の時間変化

横軸は日付(月/日), 縦軸は台風中心気圧(hPa). 6時間ごとの気象庁ベストトラック解析(赤線)とCI数をK90の表により中心気圧に変換したもの(黒の\*), 航空機観測によるドロップゾンデ観測(青のひし形)と700hPa最低高度から海面気圧への換算値(青の×). (a) T8221 (Mac), (b) T8310 (Forrest).

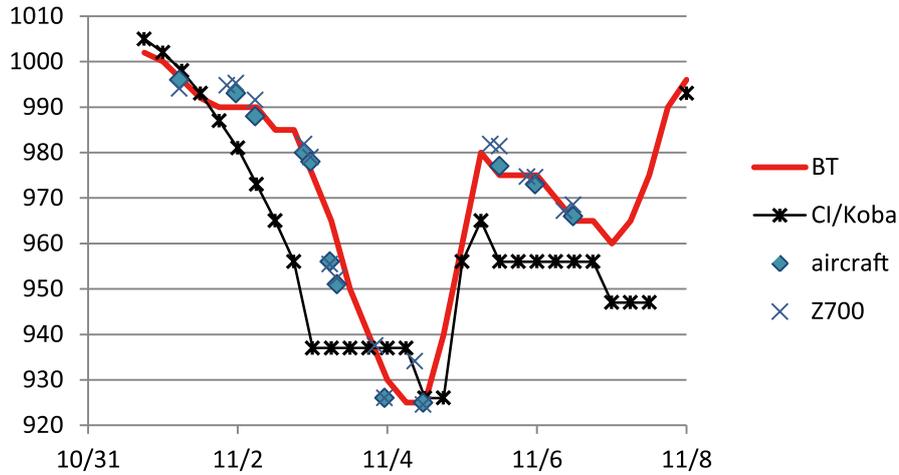
トトラックでは13hPaの差が生じている. これについては拘束条件ありの解析であれば差は8hPaとなる.

4.2 T8310 (Forrest)

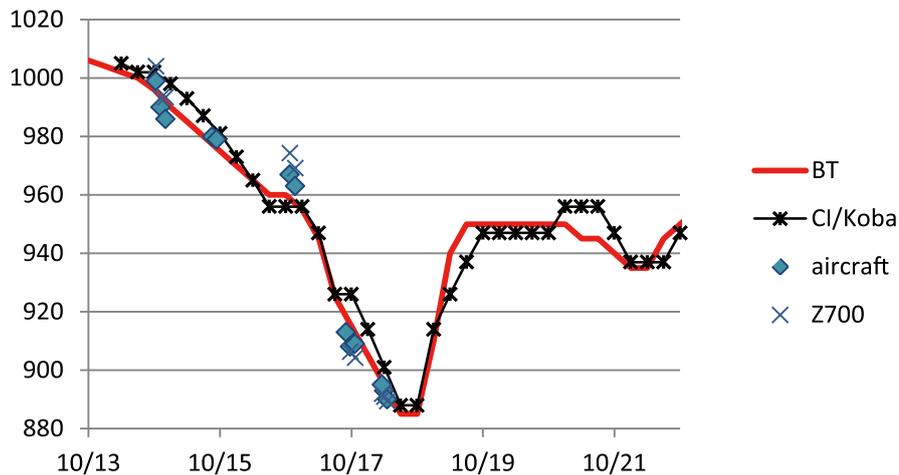
この台風(第3図b)は, 発達期はT8221と同様, CI数は2段階の増大とその間の増大休止が見られる. 9月20日18時からの2.0/24hrと22日06

時からの2.0/12hrの増大で, 後者は拘束条件を超えた発達である. これに対して, 航空機観測とベストトラックでは, 22日00時から85hPa/18hrの急発達とされている. トボラック解析との差は, 主にタイミングのずれのため, 21日18時にはベストトラックのほうが24hPa高い. 一方, 最盛期の23日00時にはベストトラックのほうが29hPa低い. 最盛期の強度が合っていなかった結果, さらにその後

(c) T8424 (AGNES)



(d) T1013 (MEGI)



第3図 (続き)

(c) T8424 (Agnes), (d) T1013 (Megi).

の衰弱の時期には、23日12時にはベストトラックのほうが37hPa低くなっている。

最盛期の構造を確認すると、航空機観測によればこの台風は最盛期には眼の直径が5海里(9km)と非常に小さいのが特徴である。ドボラック解析に対して航空機観測の中心気圧が低いのはこのためであることが考えられる。

最終段階は東シナ海での温帯低気圧化で、27日00時からCI数3.0/24hrの減少は拘束条件を超えている。しかしこの時期はCI数の減少がベストトラ

ックでの衰弱に先行しており、その結果として27日12時にはドボラック解析とベストトラックの差が28hPaとなっている。拘束条件をかけた解析を行ったとしても、この時刻のCI数は変わらないので、拘束条件は解析精度に影響しない。

#### 4.3 T8424 (Agnes)

この台風(第3図c)は、発達期の急発達と、フィリピン(陸上)通過時の急衰弱、及びその後の再発達、さらに南シナ海での急衰弱が特徴である。急

発達期には、CI 数の変化は最大でも 11 月 2 日からの 2.5/24hr と、拘束条件の範囲内にとどまっている。ただし、CI 数の変化が航空機観測・ベストトラックでの気圧低下に先行しているため、ドボラック解析とベストトラックの差は 3 日 00 時には 38hPa に達している。一方、フィリピン通過に伴う衰弱時は、航空機観測も用いて解析したベストトラックでの衰弱は 4 日 12 時から 55hPa/18hr と大きい、CI 数では急衰弱時には 2.0/12hr (約 40hPa) と拘束条件を超えているものの観測・ベストトラックには追いつかず、その後の再発達も捉えられていない。仮に解析に拘束条件をつけて急衰弱時の CI 数の変化を 1.5/12hr とするとさらに解析精度が悪くなる。拘束条件にかかわらず解析精度に限界があることには留意すべきである。

最盛期については、11 月 4 日 12 時にはドボラック解析と航空機観測がよく合っている。このときは航空機観測では直径 8 海里 (15km) と 25 海里 (46km) の二重眼として観測されていた。その前の 4 日 00 時ごろには、ドボラック解析と航空機観測とでは 20hPa の差があり、航空機観測では眼の直径が 6 海里 (11km) の小さな一重眼として記録されていて、T8310 と同様に水平スケールと台風強度の関係が考えられる。

#### 4.4 T1013 (Megi)

この 2010 年の台風 (第 3 図 d) に関しては、発達期にのみ航空機観測があり (第 2.1.2 項参照)、また CI 数の解析は拘束条件ありで行われている。発達期では、10 月 17 日 00 時は航空機観測・ベストトラックとドボラック解析では約 11hPa の差が生じている。しかし誤差に関連する 17 日 00 時の CI 数が 16 日 18 時から変化がないのは拘束条件の影響によるものではないため、17 日 00 時の解析値の差はドボラック解析の限界であると考えられる。一方、急衰弱期の CI 数は拘束条件の上限の変化が記録されており、実際には拘束条件以上の変化が生じていた可能性もある。

#### 5. 最低気圧前後の航空機観測と CI 数の比較

台風の強度に関して特に議論されるのは台風のライフサイクルにおける最大強度である。第 4 章の事例では、CI 数の解析では同じ値が連続して記録されて台風の強度変化が大きくないことが示唆される期間についても、航空機観測では短時間で大きな変化がある場合がしばしばみられた。特に、最低気圧として記録された時刻前後に着目すると、CI 数の大きな変化がなくても、航空機観測では最低気圧の時刻の 12 時間程度前や 12 時間程度後には最低気圧より 10 ~ 20hPa 程度高いことが多い。これは CI 数では 0.5 ~ 1.0 程度の差に相当する。ここでは、1980 年代の調査対象の 41 個の各台風 (第 2 表) について、航空機観測による最盛期の気圧とドボラック解析との比較した結果について調べる。

第 4 表では、各台風の航空機観測で最低気圧が観測された時刻 (以後、最低気圧時刻とする) を基準として、その前後に航空機観測で記録された中心気圧観測値の頻度を示す。ここで、第 2 表の T8511 (Nelson) は、最盛期前後に航空機観測が行われていなかったため、ベストトラックデータの最低気圧が 950hPa であるのに対して航空機観測による最低気圧が 963hPa となっている。しかし、本章の調査には含めている。第 4 表では、最低気圧時刻の前 12 時間、後 12 時間の前後は共に、平均で最低気圧より 10hPa 以上高くなっている。これは K90 の表では CI 数 0.5 程度の変化に対応する。また最低気圧時刻の前 24 時間、後 24 時間の前後は平均で最低気圧より 20hPa 以上高い。これは CI 数 1.0 以上の変化に対応する。

第 4 図では、衛星再解析において、各台風の最大 CI 数の継続回数とその頻度を示す。最大 CI 数が連続で 4 回 (18 時間) 解析された台風が最も多く、41 個中 14 個である。また最大 CI 数連続回数の平均は 4.8 回、標準偏差は 2.9 回である。つまり、平均的には 24 時間程度、同じ CI 数が解析されたことを示す。事例によっては 3 日以上同じ CI 数が解析されたものもある。なお、現行の気象庁のドボラック解析では、最初の衰弱では 12 時間は同一 CI にしておくルールがあり (菊池, 2004)、それに従

第4表 航空機による各台風の最低気圧観測時刻からの時間差(列方向)とその時間帯に観測された中心気圧差(行方向)の頻度、及び各時間帯に観測された中心気圧差の中央値・平均と標準偏差

1個の台風について最低気圧と同じ値が複数回観測された場合は、最初の観測を最低気圧観測時刻とする。  
-6~+6hrの列の数値には、その台風の最低気圧とした観測事例自体は除く。

気圧差 (hPa) ／時間 差(hr)	-42~-30	-30~-18	-18~-6	-6~+6	+6~+18	+18~+30	+30~+42
105-115							
95-105	1						
85-95	1	1					
75-85	1						
65-75	3	2	1				
55-65	10	2	1				2
45-55	6	6			1	2	4
35-45	3	8	1			3	9
25-35	7	6	4		2	9	8
15-25	5	13	4	1	7	8	3
5-15	3	9	14	5	15	5	2
0-5	0	1	12	9	6	2	1
観測数	40	48	37	15	31	29	29
中央値	49	26	6	4	11	23	36
平均	45.4	30.3	13.8	5.0	12.5	23.4	33.7
$\sigma$	21.9	19.0	15.9	4.4	10.6	12.8	14.5

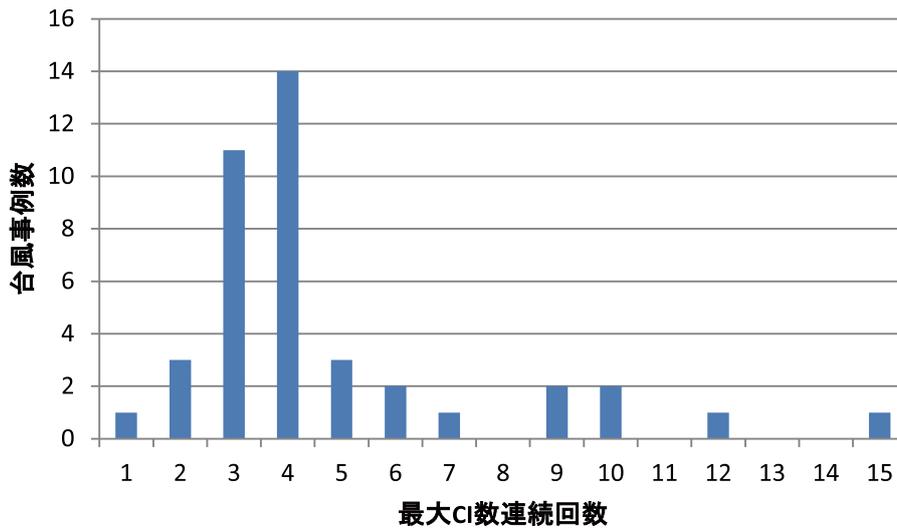
った場合は第4図では横軸は3以上の値のみを取ることになるが、実際に第4図の横軸で値が3未満の事例は少なく、41個の台風のうち4個のみである。ここから、ドボラック解析における最大強度前後のCI数の時間変化は一般に小さいと言える。

このように、航空機観測では最低気圧時刻の前後24時間程度の中心気圧観測値の変化が比較的顕著である(第4表)のに対して、最大強度時のCI数の変化は小さい(第4図)ことは、ドボラック法の解析では発達ピーク時の変化が十分にとらえられない傾向があることを示唆する。

第5表は、1981~1985年の調査対象の台風(た

だし上記のT8511(Nelson)を除外した40個の台風)について、航空機観測で最低気圧が観測された時刻の観測値を用いて、再解析CI数との比較を行ったものである。言い換えると第3表から各台風の最低気圧観測時のデータを抽出したものである。第5表では事例数が少ないので検定は行わないが、いくつかのCI数で最低気圧の平均値が全観測データの場合の平均値よりも低い傾向が見られる。特にCI=7.5の場合に差が顕著となっている。

これらから、各台風の最発達期には、CI数の変動は小さくても実際の中心気圧は1日未満の時間スケールでの大きな変動があり、各台風のライフサイ



第4図 台風事例ごとの最大CI数の継続回数（横軸）とその生じた台風事例数（縦軸）

例えば横軸の4は6時間ごとの解析で最大CI数が4回(18時間)継続していたことを表し、その頻度(縦軸)が14回ということは最大CI数の継続が4回(18時間)であった台風が14個であったことを表す。

第5表 1981 - 1985年の台風40個のそれぞれの最低気圧 (hPa) の、CI数に対する統計

全観測値の平均と標準偏差 ( $\sigma$ ) は第3表による。D84とK90は先行研究による。

CI	N	最低気圧 の平均 ( $\sigma$ )	最低気圧 の最小値/ 最大値	全観測値 の平均 ( $\sigma$ )	D84	K90
4	1	947 (-)	-	974 (13)	976	973
4.5	0	n/a	n/a	968 (13)	966	965
5	3	951 (7)	945/959	960 (11)	954	956
5.5	8	940 (13)	915/952	946 (12)	941	947
6	6	937 (9)	920/947	939 (18)	927	937
6.5	6	930 (13)	916/947	931 (16)	914	926
7	9	918 (17)	883/934	918 (17)	898	914
7.5	7	893 (8)	879/905	898 (9)	879	901
8	0	n/a	n/a	n/a	858	888

クルにおける最低気圧はCI数とK90の表から推測される値よりも低い傾向があると言える。

### 6. 近年のベストトラック解析とK90

第3.1節と第3.2節の航空機観測とCI数の比較では、K90の表は平均的な値を推定するものとし

ては問題はないことが示された。一方、第5章では、CI数の変動よりも中心気圧の変動の方が大きく、各台風の最低気圧はK90を用いて推定されるものより低くなる傾向があることも示された。本調査の最後に、CI数とK90の表を有力な資料として使用している気象庁ベストトラックデータの近年の

台風中心気圧解析値について検討する。

ここでは、第3表で標準偏差の大きいCI=6.0とそれ以上を対象とする。航空機観測の行われなかった2011～2014年の台風のうち、CI=6.0以上に発達したのは第6表の26個である。これらの台風について、6時間ごとのベストトラック解析値の統計を第7表に示した。比較として1981～1985年のCI数6.0以上の統計についても同じ表に示している。1981～1985年については、表のCI数は再解析値だが、ベストトラックは当時の観測データやCI数を用いた解析によるものである。

これらを比較すると、2011～2014年のCI数ごとの台風中心気圧は、K90及び1981～1985年と平均値ではほぼ同じだが、標準偏差は2011～2014年には小さくなっている。ここから、近年はK90に忠実に解析が行われていることが示唆される。

## 7. 結論と課題

気象庁でドボラック法において用いられているK90を用いた中心気圧について、1980年代の航空機観測と再解析CI数との直接比較により、比較的強い台風(CI数3.5以上)に関してはおおむね妥当であることが示された。そして最近のベストトラック中心気圧はK90に忠実に解析が行われる傾向が見られた。

ただし、CI数とK90を用いた解析は、統計的には妥当といっても、実際の中心気圧とCI数の値及び変化傾向には事例・観測時刻により小さくないずれがある。今回採用したCI数再解析は、主観解析に伴うばらつきを軽減するように特に注意して行われているが、それでも第3表のCI数ごとの気圧のばらつきがあることを考慮すると、現行のドボラック法におけるCI数決定の客観化等による改善には限界があるように考えられる。

事例調査では、CI数と航空機観測における台風強度の変化傾向が一致せず、特に、CI数は同じ値が続くが航空機観測では顕著な変化が見られる時期がしばしばあった。1980年代の調査対象の台風について最も発達した時期を統計的に調べたところ、そこでも、航空機観測の強度変化よりもCI数の変

化の方が小さい傾向があることが示された。このことから、最発達期の台風の1日未満の時間スケールの強度変化が、衛星赤外面像に対する現在のドボラック法の画像解析手法の適用では十分に把握されないことが示唆される。このことにより、個々の台風の中心気圧が最も低くなる時には、CI数が示唆する値よりも低い中心気圧となることがあると思われる。

今回行った1980年代の航空機観測との比較では、拘束条件の適用なしのCI数を用いた。ドボラック法におけるCI数の変化に関する拘束条件は、もともと、雲パターンの急激な変化が解析に影響することを抑制するために導入されたものである。しかし第2.2節と第4章で見た限りでは、発達時の大きな誤差は拘束条件を超えるような発達に伴って起こったというより、雲パターンの変化と中心気圧の深まりのタイミングのずれの影響が大きく、拘束条件の有無は影響が小さいように見える。台風の上陸や温帯低気圧化に伴う急速な衰弱はCI数の減少が過大な場合がしばしばあり、それらの事例については拘束条件が有効と見なせるが、発達期には拘束条件を超えるようなCI数増大に対応する中心気圧下降が現実に観測される場合もあり、拘束条件を付すことが妥当かどうかは判断できない。

今回は台風強度の指標として最大風速については議論していないが、台風による災害の軽減には気圧値よりも風速が重要である。D84とK90の風速値が大きく異なることに関しては、前者が1分平均風速、後者が10分平均風速を採用していることが理由の一つとしてよく説明され、それらの換算式も議論されている(例えばHarper *et al.*, 2010)。しかし差異の原因はそれだけでは説明できない。D84等の風速値は航空機観測を参考にしているはずだが、当時の航空機による海上風速の観測は測器によるものではなく目視観測である上に、観測できるのは飛行経路上に限定されるため、台風中心の周辺の非対称な風速分布のうちの最大風速の領域を観測できている保証がない。実際、北西太平洋の中心気圧と最大風速の関係を調査したAtkinson and Holliday (1977)では、航空機観測で中心気圧は信頼できる

第6表 2011～2014年に最大CI数6.0以上が記録された台風

台風番号	アジア名	最大CI数	最低気圧 (hPa)
1102	Songda	7	920
1106	Ma-On	6	935
1109	Muifa	6.5	930
1111	Nanmadol	7	925
1115	Roke	6.5	940
1119	Nalgae	6.5	935
1204	Guchol	6.5	930
1215	Bolaven	6	910
1216	Sanba	7.5	900
1217	Jelawat	7	905
1223	Son-Tinh	6	945
1307	Soulik	6.5	925
1311	Utor	6.5	925
1319	Usagi	7	910
1324	Danas	6.5	935
1326	Wipha	6	930
1327	Francisco	7	920
1328	Lekima	7.5	905
1330	Haiyan	8	895
1408	Neoguri	6	930
1409	Rammasun	6.5	935
1411	Halong	6.5	920
1413	Genevieve	7	915
1419	Vongfong	7.5	900
1420	Nuri	7	910
1422	Hagupit	7.5	905

値が得られるが最大風速の正確な観測値を得るのが困難として、風速の値としては陸上の観測所のデータを使用している。このように、D84及びその先行調査であるD73、D75の風速値は根拠がよくわからない。一方、K90ではベストトラックの最大風速解析値を用いているが、その解析に使用している航空機観測データの精度がわからないのでベスト

トラックの最大風速の解析精度も不明である。このため、今回の調査では1980年代の航空機観測データのうち風速については対象としなかった。D84ではD75のCI数—最大風速の関係を固定したうえで、Atkinson and Hollidayを根拠として中心気圧の値を決定していることにも留意する必要がある。他海域では航空機観測とあわせて風速と中心気圧の

第7表 1981～1985年と2011～2014年の期間における、6時間ごとのCI=6.0以上の  
の場合のベストトラック中心気圧 (hPa) の統計

Nは事例数。比較のためK90の中心気圧の値も付記した。

CI	1981-1985年		2011-2014年		K90
	N	平均 ( $\sigma$ )	N	平均 ( $\sigma$ )	
6.0	100	940 (16)	69	938 (12)	937
6.5	80	934 (19)	65	926 (10)	926
7.0	49	920 (18)	44	915 (7)	914
7.5	42	903 (10)	20	904 (3)	901
8.0	0	n/a	2	895 (0)	898

関係が調査されており、それらを参考に最大風速の推定値の検討を行う必要がある。

#### 付録A 米軍航空機による台風観測とそのデータの概要

米軍による台風（熱帯低気圧）の航空機観測のデータは、GTS回線で共有され、気象庁を含む世界の気象機関で解析に利用されている。観測時には、多くの場合は700hPa高度を飛行して、航空機搭載レーダーで台風の中心位置を決定し、その位置を通過する経路を飛行することにより、経路上の直接観測データを取得するとともに、中心付近でドロップゾンデ観測を行う。

1985年までの北西太平洋の航空機観測データは、JTWC年報に“AIRCRAFT FIXES”として掲載されている。1986年のJTWC年報にはデータは掲載されず、フロッピーディスクで配布するとされている。

1985年のJTWC年報の第2章では直接観測データとして、指定気圧面の高度、気温、飛行高度の風、海面気圧、海上風推定値（目視可能な場合）があげられている。海面気圧や気温はドロップゾンデ観測による。当時のゾンデはGPSゾンデではなかったため、ドロップゾンデによる風観測値はない。海上風の目視による推定とは、700hPa高度から見た海面の泡立ちなどの状況から主観的に推定する方法である（Weather Squadron Two, 1952；門脇、

1976）。また台風周辺の風速分布には非対称性が大きい傾向があるが、得られるデータが航空機の飛行経路上のものだけであるために最大風速データの代表性に課題があることにも注意が必要である。これらに加え、レーダー観測による眼の形状（円形／楕円／二重）や直径も記録されている。

2000年代の航空機観測に関しては、同時期に米国周辺で現業的に行われている観測と同等であり、2010年の米国ハリケーンセンターの計画（National Hurricane Center, 2010）によれば、観測データとして通報されるデータのうち、本調査に関係の深いものは以下の通りである。

- ・ 指定気圧面の最低高度：眼の中で観測された最低高度。
- ・ 中心気圧：決定した中心位置に最も近いドロップゾンデ観測による海面気圧、または飛行高度からの推定値。
- ・ 海上風の最大風速：経路上の観測値。マイクロ波放射計 SFMR (stepped frequency microwave radiometer) による観測値 (10秒平均)。それがない場合は目視による観測。
- ・ 飛行高度における最大風速：ドップラーレーダーによる、飛行経路上の10秒平均風速の最大値。

#### 付録B 徳野ほか (2009) によるドボラック法再解析の概要

本調査で用いたCI数は、2008年に気象庁で行わ

れた台風再解析 (徳野ほか, 2009) の結果を用いた。その解析法の概要は以下の通りである。

- ・ 解析対象とした台風は、1980～1986年の台風のうち、ベストトラックで最低中心気圧 950hPa 以下を満たした台風合計 51 個 (木場ほか (1990) で解析対象とされていなかった 3 個を含む)。
- ・ 3 時間ごとの画像を表示できる動画機能を用いて、6 時間ごとの 00, 06, 12, 18 時について CI 数を決定した。解析には気象衛星センターで作成した歪みの少ない正方形格子図法画像を用いた。この解析を、熟練した解析者 2 名が独立して行い、最終的に担当者が決定した。なお、K90 では 12 時間ごとの CI 数を使用していた。1980 年代には動画機能が使えず、また円形画像を用いていたので、台風の位置によっては解析精度が劣った可能性があり、再解析の方が解析精度は高く均質であると考えられる。
- ・ 再解析では、明瞭な眼が形成されて T 数が十分大きい時刻から解析を開始した。これは、DT 数 = T 数となる、解析者による差異が小さくなるような時刻の解析値を基準とするためである。これは現業的な解析の手順とは異なる。
- ・ 強度解析は T=0.5 の違いを厳密に精査した。ベストトラックの中心気圧は参考にしていない。
- ・ 「眼パターン」の DT 数を決定する際に必要となる眼階調について、現行ドボラック法では、眼階調は眼の 4 分の 1 を占める最も暖かい階調とされる (菊池, 2004) が、毎時間の眼の範囲や階調の変化は大きく、また眼が明瞭な場合は最暖領域は散在せず中心付近に集中するため、4 分の 1 を正確に採用するのは難しい。それで、この再解析では、眼が小さい場合は、おおむね 4 分の 1 を占める最も暖かい階調とし、大きな眼の場合は、眼の中心付近に明らかに存在する最も暖かい階調 (10 分の 1 程度の領域でも良い) と変更している。
- ・ 現業ドボラック法では急激な発達・衰弱の場合の T 数の変化に制限 (拘束条件) をかけているのに対して、この再解析においてはドボラック法の拘束条件ありの場合となしの場合の解析値が求められた。ただし、拘束条件は現行の解析法とは異なる

っている。拘束条件なしの解析では、それぞれの時刻で最も確からしい解析を行い、最終 T 数を決定している。拘束条件ありの解析では、最盛期の解析を真とし、24 時間前～6 時間前等の T 数が低い場合はそれらの T 数をかさ上げすることで、T 数の時間変化量等の拘束条件を満たすようにしている。すなわち、この再解析では、例えば台風の急発達時には T 数・CI 数の増大が追いつかないのではなく、実際の急発達開始の前に既に発達を開始していたような T 数・CI 数として解析されることになる。

### 付録 C 航空機観測による 700hPa 高度から台風中心気圧への換算式

航空機観測による 700hPa 高度から台風中心気圧を求めるにあたって本研究で使用した渡辺和夫の実験式 (本文第 1 式) は、過去に気象庁で使われていたものである。この式で高度をメートル (m) 単位で  $x$  とすると、

$$P_c = 634 + 0.119x \quad (C1)$$

となる。一方、Hoarau (2000) によれば JWTC では Jordan (1958) の式

$$P_c = 645 + 0.115x \quad (C2)$$

が用いられていた。700hPa 高度 2000～3000m の範囲では C1 式と C2 式の差は数 hPa 程度となる。Hoarau (2000) で取り上げられている T8310 (Forrest, 本論文第 4.2 節も参照) の 700hPa 高度が 2009m であった観測事例では、C1 式では 873 hPa, C2 式では 876hPa となる。したがってどちらの式を使っても結果に大きな差異は生じない。

### 謝辞

本研究で使用した CI 数再解析は、本論文の共著者である徳野の指導のもと、2008 年に気象衛星センターに在籍していた吉田資朗氏、小司晶子氏、酒井誠氏、及び広畑雅也氏によって行われました。貴

重な解析結果を本研究で利用することを許諾してくださいましたこれらの皆様に深く感謝します。また2000年以降のCI数事後解析値は気象庁予報部予報課太平洋台風センター（当時）に提供していただきました。あわせて感謝します。

#### 参考文献

- Atkinson, G. D. and D. R. Holliday (1977): Tropical cyclone minimum sea level pressure/ maximum sustained wind relationship for the western North Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 421-427.
- Choy, C.-W., S.-N. Chong, D. Kong, and E. O. Cayan (2015): A discussion of the most intense tropical cyclones in the western North Pacific from 1978 to 2013, *Tropical Cyclone Research and Review*, 4, 1-11.
- D'Asaro, E.A., P. G. Black, L. R. Centurioni, Y.-T. Chang, S. S. Chen, R. C. Foster, H. C. Graber, P. Harr, V. Hormann, R.-C. Lien, I.-I. Lin, T. B. Sanford, T.-Y. Tang, and C.-C. Wu (2014): Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 1405-1418.
- Dvorak, V. F. (1973): A technique for the analysis and forecasting of tropical cyclone intensities from satellite pictures, NOAA Tech. Memorandum NESS 45, 19pp.
- Dvorak, V. F. (1975): Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery, *Mon. Wea. Rev.*, 103, 420-430.
- Dvorak, V. F. (1984): Tropical cyclone intensity analysis using satellite data, NOAA Tech. Report NESDIS 11, 47pp.
- Harper, J. D. Kepert, and J. D. Ginger (2010): Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions, World Meteorological Organization, TCP Sub-Project Report, WMO/TD-No. 1555.
- Hoarau, K. (2000): Supertyphoon Forrest (September 1983): The overlooked record holder of intensification in 24, 36, and 48h, *Wea. Forecasting*, 15, 357-360.
- Jordan, C. L. (1958): Estimation of surface central pressures in tropical cyclones from aircraft observations, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 39, 345-352.
- 門脇俊一郎 (1976): 北西太平洋西部における台風観測, *気象研究ノート*, (129), 449-499.
- 菊池明弘 (2004): Dvorak法による台風の強度推定, 気象衛星画像の解析と利用 一熱帯低気圧編一, 気象衛星センター, 50-71.
- 気象庁予報部 (1973): 天気予報指針 (基礎編), 気象庁, 222pp.
- 木場博之, 萩原武士, 小佐野慎悟, 明石修平 (1990): 台風のCI数と中心気圧および最大風速の関係, *気象庁研究時報*, 42, 59-67.
- Nakazawa, T., K. Bessho, S. Hoshino, T. Komori, K. Yamashita, Y. Ohta, and K. Sato (2010): THORPEX - Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC), Technical Review of RSMC Tokyo-Typhoon Center, 12, 1-4.
- National Hurricane Center (2010): National Hurricane Operations Plan. FCM-P12-2010, U.S. Department of Commerce/ National Oceanic and Atmospheric Administration, 176pp.
- Shewchuk, J. D. and R. C. Weir (1980): An evaluation of the Dvorak technique for estimating tropical cyclone intensities from satellite imagery, NOCC/JTWC Tech. Note 80-2, 19pp.
- 徳野正己, 吉田資朗, 小司晶子, 酒井誠, 広畑雅也 (2009): 台風再解析CI数と中心気圧及び最大風速の関係, 日本気象学会2009年度秋季大会予稿集, P168.
- Velden, C., B. Harper, F. Wells, J. L. Beven, II, R. Zehr, T. Olander, M. Mayfield, C. Guard, M. Lander, R. Edson, L. Avila, A. Burton, M. Turk, A. Kikuchi, A. Christian, P. Caroff, and P. McCrone (2006): The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 1195-1210.
- Weather Squadron Two (1952): Wind Estimations from Aerial Observations of Sea Conditions, United States Navy, 29pp. (<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/seastate-aircraft.pdf>, accessed 2017-7-16)
- World Meteorological Organization (2012): Proceedings

of the International Workshop on Satellite Analysis of Tropical Cyclones, Tropical Cyclone Programme Report No. TCP-52, World Meteorological Organization, Geneva, 92pp. ([https://www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/documents/TCP-52\\_IWSATC\\_proceedings\\_en.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/documents/TCP-52_IWSATC_proceedings_en.pdf), accessed 2017-11-11)